РАЗДЕЛ 1**НАУЧНЫЕ СТАТЬИ**

DOI: 10.21870/0131-3878-2020-29-2-5-20

УДК 621.039:586:614.876:504.055

Исследование современных моделей радиационных рисков НКДАР ООН, МКРЗ и ВОЗ при их применении для оценки радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения**Чекин С.Ю., Ловачёв С.С., Кашеева П.В., Кашеев В.В., Максютлов М.А.,
Власов О.К., Щукина Н.В.**

МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск

В соответствии с действующими российскими ОСПОРБ-99/2010 показатель радиационного риска является одним из основных показателей радиационной безопасности в организации. Международные ОНБ МАГАТЭ и российские НРБ-99/2009 содержат требования о необходимости оценки индивидуальных радиационных рисков аварийных работников. Однако, ни российские, ни международные нормативные документы не содержат указаний, какими моделями радиационных рисков следует пользоваться при их оценке. В данной статье проведён сравнительный анализ современных моделей интенсивности радиационных рисков НКДАР ООН, МКРЗ и ВОЗ при их применении для прогноза радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения. Оценки радиационных рисков должны выполняться на основе общего принципа консервативности с учётом следующих положений. Для прогноза радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения в дозах свыше 50 мЗв модели интенсивностей радиационных рисков, полученные МКРЗ, НКДАР ООН и ВОЗ по радиационно-эпидемиологическим данным при остром однократном облучении, должны использоваться в их исходном виде без применения параметра DDREF, уменьшающего радиационный риск в области малых доз. Сравнительный анализ современных моделей радиационных рисков показывает, что для достигнутых возрастов младше 85 лет наиболее консервативный прогноз может быть получен с использованием моделей МКРЗ (без использования фактора DDREF) или с использованием моделей ВОЗ, которые дают практически такой же прогноз. При прогнозе радиационного риска лейкозов для мужчин в возрасте до 49 лет наиболее консервативный прогноз предоставляют модели МКРЗ, а для мужчин старше 49 лет – модели НКДАР ООН и ВОЗ.

Ключевые слова: радиационный риск, аварийное облучение, эквивалентная доза, модель интенсивности радиационного риска, избыточный абсолютный риск, избыточный относительный риск, атрибутивная радиационная доля, перенос риска между популяциями, DDREF, солидные злокачественные новообразования, лейкоз.

Введение

В соответствии с действующими российскими Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [1] одними из основных показателей радиационной безопасности в организации являются «степень готовности к эффективной ликвидации радиационных аварий и их последствий» и «показатель радиационного риска» (п. 2.2.1).

Согласно требованиям Основных норм безопасности (ОНБ) Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [2], аварийные работники должны назначаться заблаговременно,

Чекин С.Ю.* – зав. лаб.; Ловачёв С.С. – мл. научн. сотр.; Кашеева П.В. – ст. научн. сотр., к.б.н.; Кашеев В.В. – зав. лаб., к.б.н.; Максютлов М.А. – зав. отд., к.т.н.; Власов О.К. – зав. лаб., д.т.н.; Щукина Н.В. – ст. научн. сотр. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

*Контакты: 249035, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 4. Тел.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

и «информация о любых последующих рисках для здоровья должна предоставляться, насколько это практически возможно, аварийным работникам и лицам, оказывающим помощь в аварийной ситуации» (Требование 11, п. 5.49, п. 5.61). Международные основные нормы безопасности МАГАТЭ [3] устанавливают, что «организации, осуществляющие реагирование, и работодатели обеспечивают, чтобы аварийные работники, выполняющие действия, при которых получаемые дозы могут превышать 50 мЗв, были заранее ясно и всесторонне проинформированы о сопутствующих рисках для здоровья» (п. 4.17). По окончании вмешательства «соответствующим работникам предоставляется информация о полученных дозах и сопутствующих рисках для здоровья» (п. 4.18).

Здесь следует особо подчеркнуть, что вышеприведённые требования МАГАТЭ, касающиеся радиационных рисков для здоровья аварийных работников, относятся к индивидуальным рискам, а не к популяционным. В этом смысле эффективная доза не даёт адекватной информации о рисках для здоровья в конкретных облучённых когортах, так как при её вычислении используются номинальные коэффициенты риска Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) для так называемой «композитной» (собранной по множеству стран и континентов) популяции. Поэтому в современных Рекомендациях МКРЗ [4] отмечается: «Не рекомендуется использовать эффективную дозу ... для ... исследований индивидуального облучения и риска. Коллективная эффективная доза не является инструментом ... для прогнозирования риска» (пп. j, k, стр. 15).

Несмотря на декларированные в нормативных документах требования о необходимости оценки индивидуальных радиационных рисков для здоровья человека в аварийных и поставарийных ситуациях облучения, ни российские ОСПОРБ-99/2010 [1], ни международные нормы безопасности МАГАТЭ [2] не содержат указаний, какими моделями радиационных рисков следует при этом пользоваться. Неопределённость оценки индивидуальных рисков в наибольшей степени определяется неопределённостью выбора моделей для решения этой задачи. При выборе моделей, по-видимому, следует пользоваться общим принципом консервативности, т.е. выбирать для оценки рисков модель, дающую максимальные оценки риска для конкретной пологовозрастной группы людей.

Целью данной работы является сравнительный анализ современных моделей интенсивности радиационных рисков Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединённых Наций (НКДАР ООН) [5], МКРЗ [4], Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [6] при их применении для прогноза радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения.

Материалы и методы

Основные радиационно-эпидемиологические данные, по которым различными международными организациями (НКДАР ООН, МКРЗ, ВОЗ) идентифицировались и оценивались модели радиационных рисков, были данные когортных исследований населения японских городов Хиросима и Нагасаки, на которые в августе 1945 г. были сброшены атомные бомбы. В 1950 г. для изучения отдалённых эффектов действия радиации на здоровье человека была создана когорта лиц, выживших после атомных бомбардировок (Life span study cohort, LSS когорты). Наблюдение за этой когортой до настоящего времени ведёт японский Научный центр исследования радиационных эффектов. Для лиц когорты LSS по времени и месту нахождения во время взрыва были рассчитаны дозы облучения, эти дозы неоднократно пересматривались. Первоначально LSS когорты обоих городов состояла из 121000 жителей, выживших после атомной бом-

бардировки. Максимальные эквивалентные дозы облучения на всё тело в когорте LSS составляли несколько Зв, а средняя доза – порядка 0,2 Зв [7]. Поскольку в когорте LSS воздействие радиации было кратковременным и однократным, по этим данным были оценены модели интенсивности радиационных рисков (риск в год) для однократного облучения. Ниже приведена сводка современных моделей интенсивности радиационных рисков, рекомендованных МКРЗ [4], НКДАР ООН [5] и ВОЗ [6].

Модели интенсивности радиационных рисков МКРЗ

Современные рекомендации МКРЗ [4] определяют три типа ситуаций облучения: планируемое, аварийное и существующее облучение. Предполагается, что на современном уровне сложившейся практики радиационной защиты детерминированные эффекты, начинающиеся с доз порядка 200 мЗв, исключены во всех ситуациях облучения. Для характеристики аварийных ситуаций МКРЗ рекомендует контрольные уровни эффективных доз в диапазоне 20-100 мЗв. При этом основные нормы безопасности МАГАТЭ [3] устанавливают необходимость оценки радиационных рисков здоровью аварийных работников в виде стохастических эффектов, как минимум, с эффективной дозы 50 мЗв и выше. Действующие российские нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [8] для планируемого повышенного облучения вводят контрольные уровни эффективной дозы 100 и 200 мЗв.

В действующих рекомендациях МКРЗ [4] ведущими являются оценки радиационных рисков заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО), а радиационные риски смертности получаются пересчётом через коэффициенты летальности (доли летальных случаев ЗНО).

Поскольку математические модели риска заболеваемости строились на основе медицинских и дозиметрических данных когорты LSS по заболеваемости ЗНО в период 1958-1998 гг., одной из важных проблем явилась адаптация моделей для прогноза радиационных рисков в любой другой популяции, у которой иные характеристики фоновой (при отсутствии облучения) онкологической заболеваемости. Для решения этого вопроса МКРЗ предлагает использовать взвешенное среднее значений интенсивностей радиационных рисков, рассчитанных по мультипликативной модели избыточного относительного риска (ERR) и по аддитивной модели избыточного абсолютного (EAR) риска развития солидных ЗНО. В частности, для всех солидных ЗНО в совокупности веса моделей ERR и EAR одинаковы и равны 0,5.

Различие этих двух моделей заключается в том, что для вычисления интенсивности избыточного радиационного риска (аддитивного к фоновой заболеваемости), модель ERR предполагает предварительное домножение на значение фоновой заболеваемости, а модель EAR используется непосредственно как аддитивная добавка к фоновой заболеваемости. Для прогноза радиационных рисков лейкозов предполагается использование только модели EAR, линейно-квадратичной по дозе облучения. Для лейкозов, таким образом, МКРЗ предлагает использовать модель интенсивности риска, идентифицированную на японской когорте LSS за период наблюдения 1950-1998 гг., и не учитывать эпидемиологические особенности популяции, для которой выполняется прогноз риска. Последнее обстоятельство является одним из слабых мест методики МКРЗ [4] расчёта радиационных рисков.

Модели интенсивностей избыточного абсолютного риска (EAR) и избыточного относительного риска (ERR) представлены ниже формулами (1) и (2).

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{EAR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{EAR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{EAR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}, \quad (1)$$

$$ERR_{\text{однокр.}}^{\text{МКРЗ}}(s, c, g, a, d) = d \cdot \beta_{ERR}(s, c) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{ERR}(c)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_{ERR}(c)}{100}\right)^{0,1 \cdot (g-30)}, \quad (2)$$

где s – пол; c – локализация рака; g – возраст при облучении; a – возраст, на который рассчитывается риск (достигнутый возраст); d – эквивалентная доза облучения в Зв; β_{EAR} , ω_{EAR} , γ_{EAR} – параметры аддитивной модели; β_{ERR} , ω_{ERR} , γ_{ERR} – параметры мультипликативной модели (табл. 1).

Таблица 1

Параметры моделей МКРЗ [4] интенсивности радиационных рисков заболеваемости для всех солидных ЗНО в совокупности

Пол	$\beta_{ERR}, \text{Зв}^{-1}$	γ_{ERR}	ω_{ERR}	$\beta_{EAR}, 10^{-4} \times \text{Зв}^{-1}$	γ_{EAR}	ω_{EAR}
Мужской	0,35	-17	-1,65	43,20	-24	2,22
Женский	0,58			59,83		

Модель интенсивности радиационного риска заболеваемости лейкозами линейно-квадратична по дозе и применяется для прогноза радиационных рисков в любой популяции [9]:

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{лейк.}}(s, g, a, d) = \beta(s, g) \cdot d \cdot (1 + 0,79 \cdot d) \cdot \exp[\alpha(s, g) \cdot (a - g - 25)], \quad (3)$$

где β и α – параметры модели (табл. 2).

Таблица 2

Параметры модели МКРЗ [4] интенсивности риска заболеваемости лейкозами

Возраст при облучении	β		α	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
0-19 лет	3,3	6,6	-0,17	-0,07
20-39 лет	4,8	9,7	-0,13	-0,03
> 40 лет	13,1	26,4	-0,07	0,03

Применение вышеприведённых моделей предполагает, что однократное облучение оказывает действие на здоровье человека в течение всей оставшейся жизни, но спустя 10 лет после облучения – для солидных ЗНО и спустя 2 года после облучения – для лейкозов (так называемый латентный период развития ЗНО) [4].

Модели интенсивности радиационных рисков НКДАР ООН

Модели интенсивности радиационных рисков, разработанные НКДАР ООН [5], так же, как и модели МКРЗ [4], основаны на данных LSS когорты. Данные по смертности охватывают период с октября 1950 г. по декабрь 2000 г., а данные по заболеваемости – период с января 1958 г. по декабрь 1998 г. Были идентифицированы модели радиационных рисков для заболеваемости ЗНО различных локализаций. Для идентификации и оценки моделей для каждой локализации рака были рассмотрены наборы примерно по 100 случаев рака на каждую локализацию, кроме рака кости. Это позволило получить статистически значимые оценки основных параметров моделей.

Оценки параметров модели рака кости не были достаточно достоверны, тем не менее, эта модель была включена в список рекомендованных НКДАР ООН моделей. В докладе НКДАР ООН [5] представлены мультипликативные и аддитивные модели радиационного риска заболеваемости раком для 12 локализаций ЗНО. На каждую локализацию ЗНО НКДАР ООН предлагает по одной аддитивной (4) и одной мультипликативной (5) модели интенсивности радиационного риска.

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(s, c, g, a, d) = \begin{cases} 1,45293 \cdot 10^{-5} \cdot d, & c = \text{пищевод} \\ 3,96925 \cdot 10^{-7} \cdot d \cdot a^{1,828}, & c = \text{желудок} \\ 2,87527 \cdot 10^{-9} \cdot d \cdot (a - g)^{3,204}, & c = \text{толстый кишечник} \\ 1,03736 \cdot 10^{-10} \cdot d \cdot a^{3,479}, & c = \text{печень} \\ 1,00830 \cdot 10^{-11} \cdot d \cdot a^{4,211} \cdot e^{0,4008 \cdot s}, & c = \text{лёгкие} \\ 1,94038 \cdot 10^{-5} \cdot s \cdot d \cdot (a - g)^{1,086}, & c = \text{молочная железа} \\ 6,13572 \cdot 10^{-15} \cdot d \cdot a^{5,748}, & c = \text{мочевой пузырь} \\ 2,6287 \cdot 10^{-4} \cdot d \cdot g^{-0,3883} \cdot e^{1,3624 \cdot s}, & c = \text{щитовидная железа, } g > 0 \\ 2,6287 \cdot 10^{-4} \cdot d \cdot \left(\frac{1}{12}\right)^{-0,3883} \cdot e^{1,3624 \cdot s}, & c = \text{щитовидная железа, } g = 0 \\ 9,32940 \cdot 10^{-6} \cdot d^2, & c = \text{кость} \\ 5,24549 \cdot 10^{-9} \cdot d^2 \cdot (a - g)^{2,885} \cdot e^{-0,2739 \cdot d}, & c = \text{НРК} \\ 4,92382 \cdot 10^{-5} \cdot d, & c = \text{мозг и ЦНС} \\ 2,20751 \cdot 10^{-7} \cdot d \cdot (a - g)^{2,161}, & c = \text{остальные солидные} \end{cases} \quad (4)$$

$$ERR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(s, c, g, a, d) = \begin{cases} 0,52782 \cdot d, & c = \text{пищевод} \\ 4,02503 \cdot 10^3 \cdot d \cdot a^{-2,253}, & c = \text{желудок} \\ 1,48080 \cdot 10^6 \cdot d \cdot a^{-3,526}, & c = \text{толстый кишечник} \\ 3,95106 \cdot 10^{-1} \cdot d, & c = \text{печень} \\ 3,18224 \cdot 10^{-1} \cdot d \cdot e^{1,4808 \cdot s}, & c = \text{лёгкие} \\ 1,49221 \cdot 10^4 \cdot s \cdot d \cdot a^{-2,304}, & c = \text{молочная железа} \\ 8,98885 \cdot 10^{-1} \cdot d, & c = \text{мочевой пузырь} \\ 3,80452 \cdot 10^4 \cdot d \cdot g^{-0,4405} \cdot a^{-2,197}, & c = \text{щитовидная железа, } g > 0 \\ 3,80452 \cdot 10^4 \cdot d \cdot \left(\frac{1}{12}\right)^{-0,4405} \cdot a^{-2,197}, & c = \text{щитовидная железа, } g = 0 \\ 6,90379 \cdot 10^7 \cdot d^2 \cdot a^{-4,472}, & c = \text{кость} \\ 2,61526 \cdot 10^3 \cdot d^2 \cdot a^{-4,595} \cdot (a - g)^{3,196} \cdot e^{-0,272 \cdot d}, & c = \text{НРК} \\ 7,43145 \cdot d \cdot g^{-0,9879}, & c = \text{мозг и ЦНС, } g > 0 \\ 7,43145 \cdot d \cdot (0,4)^{-0,9879}, & c = \text{мозг и ЦНС, } g = 0 \\ 1,43220 \cdot 10^2 \cdot d \cdot a^{-2,939} \cdot (a - g)^{1,645}, & c = \text{остальные солидные} \end{cases} \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) s – пол (0 для мужчин и 1 для женщин); c – локализация ЗНО; g – возраст при облучении; a – возраст, на который рассчитывается риск (достигнутый возраст); d – эквивалентная доза облучения, выраженная в Зв.

В формулах (6) и (7) представлены аддитивная и мультипликативная модели радиационного риска заболеваемости лейкозами, предложенные НКДАР ООН [5] и затем принятые ВОЗ [6].

$$EAR_{\text{однокр. лейкоз. м. 4}}^{\text{НКДАР}}(s, g, a, d) = (7,51650 \cdot d + 7,77620 \cdot d^2) \cdot 10^{-4} \cdot (a - g)^{-0,6141} \cdot e^{-0,52526 \cdot s}, \quad (6)$$

$$ERR_{\text{однокр. лейкоз. м. 2.}}^{\text{НКДАР}}(s, g, a, d) = (864,552 \cdot d + 1020,9667 \cdot d^2) \cdot a^{-1,647}. \quad (7)$$

Здесь обозначения соответствуют обозначениям в формулах (4) и (5).

Так же, как и в моделях МКРЗ [4], для вычисления интенсивности избыточного радиационного риска (аддитивного к фоновой заболеваемости), каждое значение ERR (5) умножается на значение соответствующей фоновой заболеваемости (по локализации ЗНО), а значения EAR (4) дают непосредственно избыточную интенсивность радиационного риска.

В докладе НКДАР ООН [5] не представлена отдельная модель для расчёта интенсивности радиационных рисков всех солидных ЗНО в совокупности. Расчёт интенсивности радиационных рисков всех солидных ЗНО в совокупности проводится в приближении, что интенсивности избыточных абсолютных рисков для различных локализаций ЗНО (5) и (6) являются аддитивными (так же как и вклады в интенсивность избыточного абсолютного рака в заданном возрасте от нескольких однократных облучений в предыдущих возрастах).

Следует отметить, что, в отличие от рекомендаций МКРЗ [4], доклад НКДАР ООН [5] не рассматривает применение параметра DDREF при расчётах каких-либо метрик радиационных рисков.

Не обсуждается также и особая процедура переноса моделей интенсивностей радиационных рисков с той когорты, на которой они были идентифицированы (когорта LSS), на произвольные другие когорты (проблема переноса риска на другие популяции – в терминологии МКРЗ). В связи с этим, для сравнения моделей радиационных рисков МКРЗ и НКДАР ООН перенос риска в дальнейшем будет выполняться по процедуре МКРЗ, т.е. вычислением полусуммы вкладов моделей EAR и ERR в прогнозируемую интенсивность избыточного радиационного риска.

Модели интенсивности радиационных рисков ВОЗ

Основной целью международного проекта ВОЗ «Оценка рисков для здоровья в результате ядерной аварии, последовавшей после крупного землетрясения и цунами в Восточной Японии в 2011 г., на основе предварительного расчёта доз» [6] было спрогнозировать радиационные риски для здоровья, связанные с ядерной аварией на АЭС Фукусима-1 для совершенствования мер готовности к чрезвычайным радиационным ситуациям. В выполнении проекта приняли участие различные международные организации, в том числе МКРЗ, НКДАР ООН, МАГАТЭ, эксперты из научных центров Японии и других стран.

Информация о дозах, полученных ликвидаторами последствий аварии на АЭС Фукусима-1, была представлена эксплуатирующей организацией. Данные первоначально были представлены в виде эффективных доз для последующей оценки органных доз. Для оценки рисков здоровью (HRA, от англ. Health Risk Assessment) использовались только дозы, накопленные ликвидаторами аварии в течение одного года облучения (с марта по декабрь 2011 г.).

Дозы после 2011 г. рассматривались как полученные в ситуации планового или существующего облучения, поэтому не учитываются в данном проекте ВОЗ [6]. Для прогноза радиационных рисков использовалась медицинская информация, привязанная к полу и возрасту: фоновая общая смертность, фоновая заболеваемость и смертность от ЗНО и другая статистическая информация.

Эксперты группы HRA одобрили использование гибридной модели для оценки рисков по методике МКРЗ [4]: комбинацию модели относительного и абсолютного рисков для переноса оценок риска, оцененных по модели LSS когорты, на население, облучённое в результате аварии на АЭС Фукусима-1. Гибридная модель с переносом данных была одобрена экспертной группой как наиболее рациональный компромисс при предварительном варианте прогноза риска.

Однако, модели интенсивностей радиационных рисков, следующие из анализа данных по когорте LSS, группой HRA были идентифицированы и оценены заново. За основу были взяты рекомендованные МКРЗ модели [4], с немного изменённой функциональной зависимостью множителя, модифицирующего коэффициент интенсивности радиационного риска, от возраста при облучении. Для оценки радиационных рисков солидных ЗНО применяли линейную беспороговую (ЛБП) модель, а для рисков лейкозов – линейно-квадратичную по дозе облучения модель. Для того, чтобы избежать недооценки избыточных рисков ЗНО при дозах менее 100 мЗв, ЛБП модель рассматривается как наиболее подходящая.

Важным решением ВОЗ [6] явилось то, что для расчёта радиационных рисков ликвидаторов аварии на АЭС Фукусима-1, она остановилась на моделях, производных от моделей для когорты LSS, но без применения понижающего риск коэффициента DDREF.

Модель ВОЗ [6] избыточного абсолютного риска (аддитивная модель, EAR) заболеваемости солидными ЗНО после однократного облучения представлена формулой (8), а модель ВОЗ избыточного относительного риска после однократного облучения (мультипликативная модель, ERR) заболеваемости солидными ЗНО представлена формулой (9).

$$EAR_{\text{однокр.}}^{BOZ}(s, g, a, d) = (1 + \tau_{EAR} \cdot s) \cdot \beta_{EAR} \cdot d \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\alpha_a^{EAR}} \cdot \exp[-\alpha_g^{EAR} \cdot (g - 30)], \quad (8)$$

$$ERR_{\text{однокр.}}(s, g, a, d) = (1 + \tau_{ERR} \cdot s) \cdot \beta_{ERR} \cdot d \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\alpha_a^{ERR}} \cdot \exp[-\alpha_g^{ERR} \cdot (g - 30)]. \quad (9)$$

Здесь s – пол (-1 для мужчин и +1 для женщин); g – возраст при облучении; a – возраст, на который рассчитывается интенсивность риска (достигнутый возраст); d – эквивалентная доза облучения; значения остальных параметров представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры моделей ВОЗ [6] интенсивности радиационного риска заболеваемости для всех солидных ЗНО в совокупности

τ_{EAR}	$\beta_{EAR}, 10^{-4} \text{Зв}^{-1}$	α_g^{EAR}	α_a^{EAR}	τ_{ERR}	$\beta_{ERR}, \text{Зв}^{-1}$	α_g^{ERR}	α_a^{ERR}
0,1622	51,63	0,02805	2,406	0,2465	0,4666	0,01849	-1,621

Для прогнозирования радиационных рисков лейкозов ВОЗ [6] одобрила использование моделей (6) и (7), рекомендованных НКДАР ООН [5].

В дальнейшем для окончательного вычисления EAR заболеваемости всеми солидными ЗНО по модели ВОЗ [6] после однократного облучения будет выполняться взвешенное усреднение мультипликативной и аддитивной моделей по методике МКРЗ [4]:

$$EAR_{\text{однокр.}}^{BOZ}(s, g, a, d) = 0,5 \cdot [EAR_{\text{однокр.}}^{BOZ}(s, g, a, d) + \lambda_0^{3ab} \cdot (s, a) \cdot ERR_{\text{однокр.}}^{BOZ}(s, g, a, d)], \quad (10)$$

где обозначения соответствуют обозначениям в формулах (8) и (9).

Для моделей интенсивности радиационных рисков лейкозов в докладе ВОЗ [6] одобрены модели, рекомендованные НКДАР ООН [5], формулы (6) и (7).

Результаты

Для целей сравнения моделей применительно к мужскому населению России при наличии в составе рекомендованных моделей двух типов, аддитивной и мультипликативной (набор моделей МКРЗ [4] и ВОЗ [6]), для дальнейших вычислений принимается процедура переноса рисков МКРЗ [4], выраженная формулой (10).

Основной вклад в интенсивность избыточных атрибутивных рисков (EAR) заболеваемости всеми ЗНО вносят солидные ЗНО, радиационные риски которых уменьшаются с увеличением возраста при облучении. Поскольку по требованию российских НРБ-99/2009 (п. 3.2.1) [8] «планируемое повышенное облучение допускается для мужчин, как правило, старше 30 лет ... после информирования о возможных дозах облучения и риске для здоровья», в дальнейшем вычисления консервативных (наибольших) значений радиационных рисков будут проводиться для мужчин в возрасте 30 лет при облучении. Помимо этого соображения, возраст 30 лет при облучении выделяется и наиболее точной оценкой радиационных рисков (со статистической точки зрения), так как модели МКРЗ [4] и ВОЗ [6] были центрированы на этот возраст перед оценкой параметров по радиационно-эпидемиологическим данным, что показывают формулы (1), (2), (8) и (9).

На рис. 1 показаны интенсивности избыточных атрибутивных рисков (EAR) заболеваемости всеми солидными ЗНО после однократного внешнего облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет, рассчитанные по различным рекомендованным моделям [4-6]. В моделях мультипликативного риска использовались фоновые показатели заболеваемости солидными ЗНО мужского населения России [10].

Рис. 1. Интенсивности избыточных атрибутивных рисков (EAR) заболеваемости всеми солидными ЗНО после однократного облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет для российской популяции [10].

Поскольку на основе моделей радиационных рисков МКРЗ [4] определяются дозовые пределы, ограничения и контрольные уровни современной системы радиологической защиты, на рис. 2 приведена нормировка значений EAR, рассчитанных по моделям ВОЗ [6] и НКДАР ООН [5], на величину EAR, рассчитанную по моделям МКРЗ [4].

При повышенном планируемом облучении и при облучении в аварийной ситуации типичным сценарием облучения является кратковременное однократное облучение. В таких ситуа-

циях радиационные риски человека должны рассчитываться непосредственно по приведённым в этой статье моделям, без учёта фактора DDREF. Рис. 1 и 2 при этом демонстрируют, что модели интенсивностей радиационных рисков НКДАР ООН [5] для достигнутых возрастов младше 85 лет дают наименьшие прогнозные значения EAR, в то время как прогнозы по моделям МКРЗ [4] и ВОЗ [6] практически совпадают.

Рис. 2. Отношение интенсивностей избыточных атрибутивных рисков (EAR) заболеваемости всеми ЗНО, рассчитанных по моделям ВОЗ [6] и НКДАР ООН [5], к величине EAR, рассчитанной по моделям МКРЗ [4], для мужского населения России [10] после однократного облучения дозой 100 мЗв в возрасте 30 лет.

На рис. 3 показаны интенсивности избыточных атрибутивных рисков (EAR) заболеваемости лейкозами после однократного внешнего облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет, рассчитанные по различным рекомендованным моделям [4-6]. В моделях мультипликативного риска [5, 6] использовались фоновые показатели заболеваемости лейкозами мужского населения России [10].

Рис. 3. Интенсивности избыточных атрибутивных рисков (EAR) заболеваемости лейкозами после однократного облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет для российской популяции [10].

В отличие от EAR солидных ЗНО, EAR лейкозов уменьшается с увеличением достигнутого возраста. Максимальные значения EAR лейкозов до возраста 49 лет даёт модель риска МКРЗ [4]. Начиная с достигнутого возраста 49 лет и старше более консервативную оценку риска лейкозов предоставляют модели НКДАР ООН [5] и ВОЗ [6]. Для этих старших возрастов радиационные риски солидных ЗНО на порядок превосходят риски лейкозов, поэтому в целом по всем ЗНО для всех достигнутых возрастов наиболее консервативными моделями можно считать модели МКРЗ [4]. При существенно неравномерном облучении тела, когда радиационный риск лейкозов может быть сравним или выше, чем радиационный риск солидных ЗНО, оптимизация радиационной защиты для лиц старше 49 лет будет требовать привлечения оценок радиационных рисков лейкозов по моделям НКДАР ООН [5] и ВОЗ [6].

В основе расчётов всех метрик радиационных рисков лежат модели интенсивности избыточного абсолютного риска EAR. Атрибутивная доля радиации (ARF) в этиологии заболеваемости ЗНО является производной от EAR метрикой интенсивности радиационного риска, которая имеет для солидных ЗНО иную возрастную зависимость и определяется обычно как $ARF = (100\%) \times EAR / (BIR + EAR)$, где BIR – фоновая частота рассматриваемых ЗНО (фоновый риск) [11].

На рис. 4 показана возрастная зависимость атрибутивной радиационной доли (ARF) заболеваемости всеми солидными ЗНО после однократного облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет для российской популяции [10].

Рис. 4. Атрибутивная радиационная доля (ARF) заболеваемости всеми солидными ЗНО после однократного облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет для российской популяции [10].

В отличие от EAR (рис. 1), ARF солидных ЗНО уменьшается с возрастом вплоть до возрастов порядка 70 лет. Эта разнонаправленность изменения метрик EAR и ARF с увеличением достигнутого возраста должна учитываться при разработке методов оптимизация радиационной защиты человека.

Наиболее консервативными оценками радиационного риска солидных ЗНО в метрике ARF, так же как и в метрике EAR, можно считать оценки, полученные по моделям МКРЗ [4] и ВОЗ [6], вплоть до достигнутых возрастов 85 лет и старше.

На рис. 5 показана атрибутивная радиационная доля (ARF) заболеваемости лейкозами после однократного облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет для российской популяции [10]. Здесь следует отметить, что ARF лейкозов для возрастов младше 50 лет многократно превосходит ARF солидных ЗНО, что так же должно учитываться при разработке методов оптимизации радиационной защиты при аварийном облучении.

Рис. 5. Интенсивности избыточных атрибутивных рисков (EAR) заболеваемости лейкозами после однократного облучения в дозе 100 мЗв мужчин в возрасте 30 лет для российской популяции [10].

Максимальные значения EAR лейкозов до возраста 49 лет даёт модель риска МКРЗ [4]. Так же, как и для EAR, начиная с достигнутого возраста 50 лет и старше, более консервативную оценку ARF лейкозов предоставляют модели НКДАР ООН [5] и ВОЗ [6], что может потребовать использования этих моделей при оптимизации радиационной защиты лиц старше 50 лет в случае существенно неравномерного облучения тела с высоким радиационным риском лейкозов.

Обсуждение результатов

Применительно к ситуациям аварийного облучения следует остановиться на применимости к расчётным оценкам радиационных рисков такого параметра, как «коэффициент эффективности дозы и мощности дозы» (DDREF). DDREF – это «экспертно оценённый параметр, который объясняет обычно сниженную биологическую эффективность (на единицу дозы) радиационного воздействия малых доз и малых мощностей доз, если сравнивать её с эффективностью высоких доз и высоких мощностей доз» [4].

Поскольку МКРЗ принимает значение DDREF=2, снижающее в 2 раза значения радиационных рисков, рассчитанных по моделям, исходно идентифицированным в японской когорте LSS, рассмотрим соответствующую аргументацию МКРЗ.

Цитата [4]: «(65) ...практическая система радиационной защиты, рекомендованная Комиссией, по-прежнему основывается на предположении о том, что при дозах ниже приблизительно 100 мЗв заданное увеличение дозы приведёт к прямо пропорциональному увеличению вероятности развития рака или наследственных эффектов, связанных с облучением. Эта модель за-

висимости доза-эффект обычно называется линейной беспороговой (ЛБП) моделью. Такая точка зрения согласуется с точкой зрения НКДАР ООН, ... тогда как Академия Наук Франции ... настаивает на существовании практического порога для радиационного риска рака. ... Комиссия считает, что использование ЛБП модели совместно с экспертной оценкой коэффициента эффективности дозы и мощности дозы (DDREF) обеспечивает устойчивую основу для практических целей радиационной защиты, то есть для управления рисками облучения в малых дозах».

Здесь МКРЗ рекомендует для доз менее 100 мЗв уменьшать в 2 раза вероятность (риск) развития ЗНО (рака), по сравнению с величиной, полученной с использованием исходных (идентифицированных в японской когорте LSS) ЛБП моделей риска. Ключевыми предпосылками такой позиции МКРЗ являются:

1) собственно понятие риска («вероятности развития рака»), под которым, по определению, понимается пожизненный риск, а также

2) «управления рисками облучения», где последнее наиболее характерно для планируемых ситуаций облучения персонала, т.е. для ситуаций планируемого пролонгированного облучения.

Фактически, МКРЗ [4] предоставляет методику использования параметра DDREF только при разработке системы взвешивающих коэффициентов ткани, которыми определяется величина эффективной дозы:

«а) определение риска пожизненной онкологической заболеваемости для радиационно-индуцированных раков, ...

б) введение коэффициента эффективности дозы и мощности дозы (DDREF): оценки пожизненного риска были снижены в 2 раза для учёта DDREF ...».

Согласно цитированной выше методике, параметр DDREF используется МКРЗ для снижения в 2 раза пожизненных рисков солидных ЗНО (при дозах облучения менее 100 мЗв), но не для уменьшения оценок интенсивностей радиационных рисков.

Такой подход вполне оправдан при расчёте коэффициента пожизненного радиационного риска на единицу накопленной дозы в случае длительного пролонгированного облучения когорты с постоянной во времени мощностью дозы. В этом случае, в расчёте на единицу суммарной накопленной дозы, коэффициент пожизненного риска должен быть уменьшен примерно в 2 раза, так как доза за первый год облучения вносит вклад в интенсивность риска всё последующее время (с учётом латентного периода развития ЗНО), а дозы облучения за последующие годы вносят вклады в интенсивность риска за монотонно уменьшающиеся, вплоть до нуля, периоды времени.

Напротив, для прогноза радиационных рисков в ситуациях однократного аварийного облучения в дозах порядка 100 мЗв, модели интенсивностей радиационных рисков, полученные по радиационно-эпидемиологическим данным при остром однократном облучении (по когорте LSS), должны использоваться в их исходном виде, без применения параметра DDREF.

Формально МКРЗ [4] рекомендует использовать фактор DDREF=2 для уменьшения рисков при облучении дозами менее 100 мЗв. Рис. 1 и 2 демонстрируют, что в этом случае прогнозируемые по моделям ВОЗ [6] и НКДАР ООН [5], радиационные риски существенно выше прогноза по моделям МКРЗ [4].

Следуя принципу консервативности, для обоснования дозовых пределов и ограничений современной системы радиологической защиты в ситуациях планируемого облучения следовало бы использовать модели ВОЗ [6] или МКРЗ [4] без фактора DDREF, прогнозы по которым,

как показывает рис. 2, практически совпадают. В этом случае используемые сегодня в практике радиационной защиты дозовые ограничения и пределы уменьшились бы примерно в 2 раза.

Однако следует помнить, что при длительном пролонгированном облучении, например для персонала группы А в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующих излучений (ИИИ) или для хронического облучения населения в ситуациях существующего облучения, пожизненный радиационный риск примерно в 2 раза ниже, чем при остром облучении такой же суммарной дозой [12]. Поэтому дозовые ограничения и пределы, приведённые в НРБ-99/2009 [8] для номинальной эксплуатации ИИИ корректны для типичных сценариев облучения в таких условиях.

Выводы

Требования ОНБ МАГАТЭ [2] и НРБ-99/2009 [8] об информировании аварийных работников и привлекаемых лиц о рисках для здоровья, связанных с их облучением, а также требования ОСПОРБ-99/2010 [1] об оценке радиационного риска должны выполняться на основе общего принципа консервативности оценки радиационных рисков, с учётом следующих положений.

1) Для прогноза радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения в дозах свыше 50 мЗв, модели интенсивностей радиационных рисков, полученные МКРЗ [4], НКДАР ООН [5] и ВОЗ [6] по радиационно-эпидемиологическим данным при остром однократном облучении (когорты LSS [7]), должны использоваться в их исходном виде, без применения параметра DDREF, уменьшающего радиационный риск в области малых доз.

2) Сравнительный анализ современных моделей радиационных рисков МКРЗ [4], НКДАР ООН [5] и ВОЗ [6] при их применении для прогноза радиационных рисков в ситуациях аварийного облучения показывает, что для достигнутых возрастов младше 85 лет наиболее консервативный прогноз (наибольшая интенсивность радиационного риска) может быть получен с использованием моделей МКРЗ [4] (без использования фактора DDREF) или с использованием моделей ВОЗ [6], которые дают практически такой же прогноз.

3) При прогнозе радиационного риска лейкозов для мужчин в возрасте до 49 лет наиболее консервативный прогноз предоставляют модели МКРЗ [4], а для мужчин старше 49 лет – модели НКДАР ООН [5] и ВОЗ [6].

Дополнительно следует отметить, что избыточный атрибутивный риск (EAR) заболеваемости всеми солидными ЗНО после однократного облучения увеличивается с достигнутым возрастом облучённого лица, в то время как атрибутивная радиационная доля (ARF) ЗНО уменьшается с достигнутым возрастом, как минимум до возрастов порядка 70 лет. Эта разнонаправленность изменения метрик EAR и ARF с увеличением достигнутого возраста может учитываться при разработке методов оптимизации радиационной защиты.

Литература

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила. СП 2.6.1.2612-10. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации Минздрава России, 2010.
2. Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. Общие требования безопасности № GSR Part 7. Вена: МАГАТЭ, 2016. 120 с.
3. Радиационная защита и безопасность источников излучения. Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 311 с.
4. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /под ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006. Report Vol. I, Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. New York: United Nation, 2008. 314 p.
6. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami based on a preliminary dose estimation. Geneva: WHO, 2013. 172 p.
7. **Ozasa K., Shimizu Y., Suyama A., Kasagi F., Soda M., Grant E.J., Sakata R., Sugiyama H., Kodama K.** Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 14. 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases //Radiat. Res. 2012. V. 177, N 3. P. 229-243.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
9. **Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsuo T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K.** Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987 //Radiat. Res. 1994. V. 137, N 2. P. S68-S97.
10. Злокачественные новообразования в России в 2014 году (заболеваемость и смертность) /под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2016. 250 с.
11. **Иванов В.К., Корело А.М., Чекин С.Ю., Панфилов А.П., Михеенко С.Г., Усольцев В.Ю.** Риск-ориентированный подход к оптимизации радиологической защиты персонала группы А Госкорпорации «Росатом»: формирование критических групп //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 19-27.
12. **Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максюттов М.А., Корело А.М., Туманов К.А., Пряхин Е.А., Ловачев С.С., Карпенко С.В., Кашеева П.В., Иванов В.К.** Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 1. С. 8-21.

Research of modern models of radiation risks from UNSCEAR, ICRP and WHO at their application for assessment of radiation risks in emergency exposure situations

Chekin S.Yu., Lovachev S.S., Kashcheeva P.V., Kashcheev V.V., Maksoutov M.A.,
Vlasov O.K., Shchukina N.V.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

According to the current Russian OSPORB, the indicator of radiation risk is one of key indicators of radiation safety establishments, where radioactive substances and other sources of ionizing radiation are used. The IAEA BSS and Russian NRB-99/2009 require that individual radiation risks for emergency workers should be estimated. However, neither the Russian nor international normative documents contain recommendations what radiation risk assessment models should be used for these purposes. This article presents comparative analysis of applicability of current models of radiation risks intensity recommended by UNSCEAR, ICRP and WHO to predict risk values in case of radiation emergency situations. Radiation risks should be estimated on the basis of the general principle of conservativity, with account of the following statements. To predict risks in case of radiation emergency exposure to doses above 50 mSv, unmodified models of radiation risks intensity developed by UNSCEAR, ICRP and WHO with the use of radiation epidemiological data following single acute radiation exposure should be used. Comparative analysis of current radiation risks models demonstrates that for people who do not attain the age of 85 years the most conservative predictive estimates can be obtained with the use of the DDREF-free ICRP models or with the use of WHO models, both options give practically the same forecast. In men with attained age younger than 49 years the most conservative predicted risk of leukaemia is obtained with ICRP models. For men older than 49 years – with UNSCEAR and WHO models.

Key words: radiation risk, emergency exposure, equivalent dose, model of intensity of radiation risk, excess absolute risk, excess relative risk, attributive radiation fraction, transfer of risk between populations, DDREF, solid cancers, leukemia.

References

1. Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99/2010). Health regulations, SP 2.6.1.2612-10. Moscow, Center for Sanitary and Epidemiological Rationing, Hygienic Certification of Russian Ministry of Health, 2010. (In Russian).
2. Preparedness and response in case of a nuclear or radiological emergency. General safety requirements No. GSR Part 7. Vienna, IAEA, 2016. 120 p. (In Russian).
3. Radiation protection and safety of radiation sources. International Basic Safety Standards. General safety requirements. Series of standards of safety of IAEA No. GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2015. 311 p. (In Russian).
4. Publication 103 International Commissions on Radiation Protection (ICRP). Eds.: M.F. Kiselyov and N.K. Shandala. Moscow, Prod. LLC PKF Alana, 2009. 312 p. (In Russian).
5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report Vol. I, Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. New York, United Nation, 2008. 314 p.
6. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami based on a preliminary dose estimation. Geneva, WHO, 2013. 172 p.
7. Ozasa K., Shimizu Y., Suyama A., Kasagi F., Soda M., Grant E.J., Sakata R., Sugiyama H., Kodama K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat. Res.*, 2012, vol. 177, no. 3, pp. 229-243.

Chekin S.Yu.* – Head of Lab.; Lovachev S.S. – Research Assistant; Kashcheeva P.V. – Senior Researcher; C. Sc., Biol.; Kashcheev V.V. – Head of Lab., C. Sc., Biol.; Maksoutov M.A. – Head of Dep., C. Sc., Tech.; Vlasov O.K. – Head of Lab., D.Sc., Tech.; Shchukina N.V. – Senior Researcher. A. Tsyb MRRC.

*Contacts: 4 Korozyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249035. Tel.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

8. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russian).
9. **Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsuo T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K.** Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat. Res.*, 1994, vol. 137, no. 2, pp. S68-S97.
10. *Malignant neoplasms in Russia in 2014 (morbidity and mortality)*. Eds.: A.D. Kaprin, V.V. Starinskiy, G.V. Petrova. Moscow, P. Hertsen MORI, 2016. 250 p. (In Russian).
11. **Ivanov V.K., Korelo A.M., Chekin S. Yu., Panfilov A.P., Mikheenko S. G., Usoltcev V.Yu.** Risk-based approach to optimization of the radiological protection of group A personnel of the State Corporation Rosatom: formation of critical groups. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 19-27. (In Russian).
12. **Menyajlo A.N., Chekin S.Yu., Kashcheev V.V., Maksioutov M.A., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin E.A., Lovachev S.S., Karpenko S.V., Kashcheeva P.V., Ivanov V.K.** Lifetime attributable risks from external and internal exposure to radiation: method for estimating. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 8-21. (In Russian).